



## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

К.Лукин, Новгородский государственный  
университет им.Ярослава Мудрого,  
Д.Павлов, ЗАО "ЭЛСИ", Великий Новгород,  
<http://elsy.nov.ru>, [lukinkg@mail.ru](mailto:lukinkg@mail.ru)

Многоспектральные приборы успешно внедряются в сканирующие системы слежения и автосопровождения, предназначенные для разведки. Однако, на качество автосопровождения и точность наведения на объекты сказывают влияние погрешности системы. Чувствительность аппаратуры к температурным перепадам ведет к ухудшению точности стабилизации и автосопровождения системы. Статья посвящена разработке метода температурной калибровки волоконно-оптических гироскопов, которые входят в состав подсистемы гиросtabilизации сканирующей системы с многоспектральной аппаратурой.

**З**АО "ЭЛСИ" занимается разработками многофункциональных гиросtabilизированных оптико-электронных систем (МОЭС) для беспилотных летательных аппаратов, вертолетов, самолетов, морских и речных судов, а также для других подвижных средств. В состав МОЭС (рис.1) входит подсистема гиросtabilизации (ПГС), основным узлом которой является модуль гироскопических датчиков (МГД). Блок МГД включает в себя волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) и электронный модуль обработки.

Исходя из функциональных предназначений прибора для работы в жестких климатических условиях, основное требование, предъявляемое разработчиками к МОЭС, – это обеспечение точности гиросtabilизации. Известно [1], что изменение температуры элементов ВОГ в процессе работы гироскопа сильно влияет на его эксплуатационные характеристики. Поэтому перед разработчиками встает задача температурной калибровки МГД. Под калибровкой системы подразумевается задача определения температурных погрешностей навигационной системы и их корректировка.

## SIMULATION MODEL OF FIBER-OPTIC GYROSCOPE

K. Lukin, D.Pavlov, Yaroslav-the-Wise  
Novgorod State University,  
D.Pavlov, JSC "ELSY", Velikiy Novgorod,  
<http://elsy.nov.ru>, [lukinkg@mail.ru](mailto:lukinkg@mail.ru)

Multispectral devices are successfully introduced into maritime patrol scanning systems, surveillance and auto-tracking systems, designed to rescue intelligence and remote monitoring of the dynamics of terrestrial ecosystems. However, the quality of autotracking and pointing accuracy depends on the errors of the system. Imaging technology depends on the accuracy of georeferencing images on navigation data. At the same time sensitivity of instruments to temperature changes leads to worsening of accuracy of stabilization, defocusing of image and autotracking. Article is devoted to development of a method of temperature calibration of fiber-optic gyroscopes functioning as a part of the gyrostabilization subsystem of multispectral scanning system hardware.

**J**CS "ELSY" has been developing of multipurpose gyro-stabilized optical-electronic observation system – MOS (Fig.1), which are part of unmanned aerial vehicles, helicopters, aircraft, marine and river vessels and other vehicles. Optical-electronic observation system contains a gyrostabilization subsystem (including gyroscopic sensors module). The basis of gyroscopic sensors module are fiber-optic gyroscopes (FOG) and electronic processing unit.

The main requirement for optical-electronic observation systems is gyrostabilization accuracy. As change of temperature of FOG in the course of their work strongly influence their operational characteristics. There are problems of temperature calibration of the gyroscopic sensors module before developers.

In full-scale climatic testing could not be recreated all combinations of variational of environmental changes. MOS developers are using a mathematical model of FOG capable to describe the functioning of the device to

При проведении натурных климатических испытаний невозможно воссоздать все комбинации вариационных изменений условий окружающей среды. Для замены многомерных натурных испытаний МОЭС разработчики используют математическую модель ВОГ, способную описать функционирование прибора. Ранее используемая модель не рассматривала влияние температурных изменений в широком диапазоне. Для достижения высоких точностей гиросtabilизации в рабочем диапазоне температур требуется предварительно тщательно исследовать температурные составляющие дрейфа нуля и среднеквадратического отклонения (СКО) шума ВОГ [2].

При исследовании погрешностей было принято, что выходной сигнал ВОГ  $U_{out}$  содержит мультипликативную и аддитивную погрешности. Мультипликативная погрешность обусловлена температурными искажениями масштабного коэффициента. Аддитивная погрешность связана с наличием двух факторов, чувствительных к температуре – это дрейф нулевого значения выходного сигнала и шум гироскопа.

Выходной сигнал гироскопа в общем виде можно представить как

$$U_{out} = k(T) \cdot \omega + U_d(T) + N(T), \quad (1)$$

где  $U_{out}$  – выходное напряжение гироскопа, В;  $U_d(T)$  – дрейф нулевого значения выходного сигнала, В;  $k(T)$  – масштабный коэффициент гироскопа, В/град/с;  $\omega$  – измеряемая угловая скорость, град/с;  $N(T)$  – шум гироскопа, В.

Дрейф нуля выходного сигнала ВОГ обусловлен несколькими причинами:

- взаимовлиянием аналоговых цепей;
- смещением операционных усилителей;
- смещением спектра суперлюминесцентного светодиода;
- модуляцией двулучепреломления в модуляторе;
- магнитооптическим эффектом Фарадея;
- тепловым расширением волокна в интерферометре.

Нагрев всех оптических и электрических компонентов приводит к увеличению дрейфа нулевого значения выходного сигнала. Шум гироскопа в основном обусловлен шумами фотоприемника и шумами аналоговых цепей. Температурный дрейф нуля – это основная погрешность, которую необходимо тщательно исследовать.



**Рис.1.** Эскизный макет многоспектральной гиросtabilизированной оптико-электронной системы наблюдения (МОЭС)

**Fig. 1.** Conceptual model of multipurpose gyro-stabilized optical-electronic observation system (MOES)

replace the multivariate natural tests. Earlier model does not take into account the effect of wide range temperature changes. Achievement of high accuracy of gyrostabilization in the wide range of temperatures, requires careful research of temperature components of drift of zero and a mean square deviation of noise of fiber-optical gyroscopes.

Gyroscope output signal contains multiplicative and additive errors. The multiplicative error depends on temperature distortion of scale factor. Additive error contains two temperature factors: zero drift and noise.

Gyroscope output signal:

$$U_{out} = k(T) \cdot \omega + U_d(T) + N(T), \quad (1)$$

where  $U_{out}$  [V] – output voltage;  $U_d(T)$  [V] – zero drift;  $k(T)$  [V/deg/s] – scale factor;  $\omega$  [deg/s] – angular velocity;  $N(T)$  [V] – temperature noise.

Zero drift in FOG d is caused by several reasons:

- interference of analog circuits;
- shift of operational amplifiers;
- shift of a spectra of a superluminescent light-emitting diode;
- two-refraction modulation in the modulator;
- Faraday's magneto-optical effect;
- thermal expansion of fiber in the interferometer.

Heating of all the optical and electrical components leads to an increase of zero drift in output signal. The gyroscope noise is mainly caused by photodetector noise and analog circuits

Для количественной оценки параметров температурной зависимости шума гироскопа и дрейфа нуля были проведены экспериментальные исследования зависимости выходного сигнала гироскопа от температуры для трех гироскопов VG091A фирмы "Физоптика". Исследования проводились на имитационной модели ВОГ (рис.2). Для ее разработки была использована среда Simulink, входящая в состав MATLAB.

Для моделирования эффекта температурной зависимости дрейфа нуля выходного сигнала гироскопа с целью аппроксимации среднего значения  $U_{out}$  использован полином второй степени. При моделировании температурной зависимости СКО шума использована линейная аппроксимация среднего значения выходного сигнала гироскопа  $U_{out}$ . В температурной модели (в опытах использована шкала Цельсия) границы диапазона приняты от 0 до 48°C. Исследования в области отрицательных температур не проводили, так как и ВОГ, и электронный модуль обработки работают внутри герметичного корпуса МОЭС с подогревом. То есть подразумевается, что внутри данного блока не могут существовать условия с температурой ниже 0°C. Для каждого из трех гироскопов были получены следующие зависимости выходного сигнала от температуры:

$$U_{d1}(T) = 1,023 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 2,616 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,000307;$$

$$U_{d2}(T) = 0,853 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 7,483 \cdot 10^{-6} \cdot T - 0,000002;$$

$$U_{d3}(T) = 3,049 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 3,178 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,000071;$$

$$\sigma_1(T) = 4,26 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,000012;$$

$$\sigma_2(T) = 1,77 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,000037;$$

$$\sigma_3(T) = 2,45 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,000061.$$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для замены натуральных испытаний МОЭС разработчики применили ранее существующую математическую модель функционирования ВОГ. Однако используемая модель не учитывала изменение дрейфа нуля выходного сигнала и СКО шума гироскопа от температуры. Поэтому была поставлена задача разработать новую имитационную модель, учитывающую зависимости дрейфа нуля и СКО шума ВОГ в широком диапазоне температур. Созданная имитационная модель [3], учитывающая температурные зависимости выходного

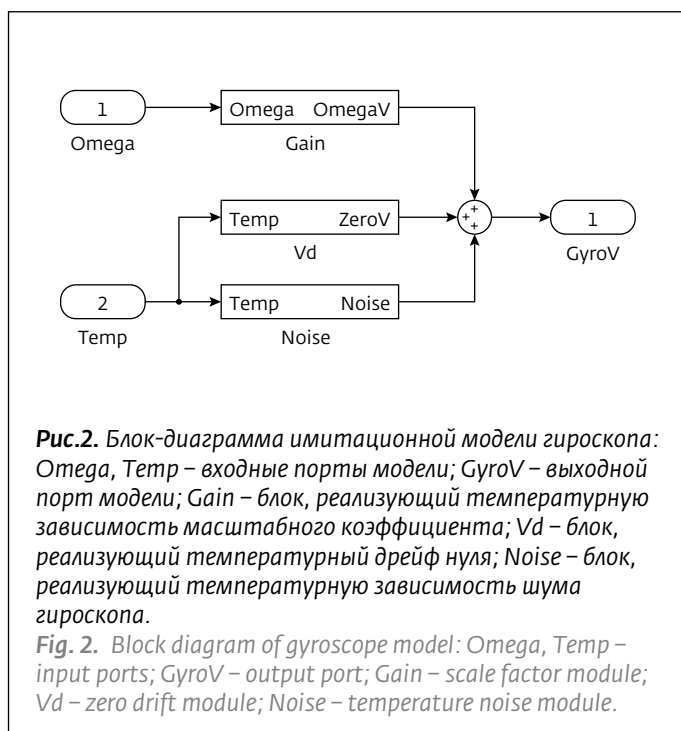


Рис.2. Блок-диаграмма имитационной модели гироскопа: Omega, Temp – входные порты модели; GyroV – выходной порт модели; Gain – блок, реализующий температурную зависимость масштабного коэффициента; Vd – блок, реализующий температурный дрейф нуля; Noise – блок, реализующий температурную зависимость шума гироскопа.

Fig. 2. Block diagram of gyroscope model: Omega, Temp – input ports; GyroV – output port; Gain – scale factor module; Vd – zero drift module; Noise – temperature noise module.

noise. Temperature drift of zero signal is the main error that must be well explored.

Experimental studies were made to obtain parameters of the temperature (T) dependence of noise and zero drift. To simulate the effect of zero drift made the approximation of average output signal:

$$U_{d1}(T) = 1,023 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 2,616 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,000307;$$

$$U_{d2}(T) = 0,853 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 7,483 \cdot 10^{-6} \cdot T - 0,000002;$$

$$U_{d3}(T) = 3,049 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 3,178 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,000071;$$

$$\sigma_1(T) = 4,26 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,000012;$$

$$\sigma_2(T) = 1,77 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,000037;$$

$$\sigma_3(T) = 2,45 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,000061.$$

These expressions were received in the temperature range from 0 °C to +48 °C. Researches in the field of negative temperatures weren't conducted as FOG and the electronic module of processing work in the multipurpose gyro-stabilized optical-electronic observation system tight case with heating. In this block temperature fall lower than 0 °C isn't provided. Model was developed using Simulink, which is part of MATLAB.



сигнала гироскопа, позволила повысить точность гиросtabilизации МОЭС в широком интервале температур на 30%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Logozinski V., Solomatin V.** Built-in Drift Compensation of Open Loop FOG. Report of the 4th St.-Petersburg International Conference on Integrated Navigation. Systems. Russia, St.-Petersburg, 1997.
2. **Вахрамеев Е.И.** Тепловой дрейф волоконно-оптического гироскопа. – Известия вузов. Сер. Приборостроение. 2011, т.54, № 1, с.32–37.
3. **Павлов Д.В., Лукин К.Г., Петров М.Н.** Разработка модели волоконно-оптического гироскопа в среде Simulink. – Вестник НовГУ, 2012, с.106–109.

## CONCLUSION

For replacement of natural tests of multipurpose gyro-stabilized optical-electronic observation system developers used earlier existing FOG mathematical model. However, earlier used model didn't consider change of drift of zero and noise mean square deviation from temperature. Therefore the task to develop new simulation model in which dependences of drift of zero and mean square deviation of noise of FOG in the wide range of temperatures are considered was set.

The given simulation model considers dependence of drift of zero and noise mean square deviation on temperature that allows to increase the accuracy of gyrostabilization of multipurpose gyro-stabilized optical-electronic observation system in a wide interval of temperatures for 30%.

## ИННОВАЦИИ В НАУКЕ, ПРОИЗВОДСТВЕ И ОБРАЗОВАНИИ

Ситуация неопределенности в экономике России, оптимальные действия в этой ситуации участников рынка научных, производственных и образовательных услуг будут в центре внимания участников III Международной научно-практической Конференции "Инновации в науке, производстве и образовании", которая состоится 13–14 октября 2014 года в Рязанском государственном университете имени С.А. Есенина (Рязань). Конференция проводится в рамках года науки "РОССИЯ- ЕЭС". Главное направление Конференции – состояние и перспективы разработки и внедрения инновационных технологий и результатов фундаментальных и прикладных исследований в различных областях науки, производства и образования.

Основные направления работы секций:

1. Интеграция образования, науки и производства через научно-образовательные центры.
2. Инновации в образовании.
3. Аналитическое приборостроение. Масс-спектрометрия. Современные методы исследования.
4. Неразрушающие методы контроля и диагностики процессов и материалов в промышленности.
5. Физика и технология полупроводников. Наноматериалы и нанотехнологии.
6. Физика и техника плазмы, газоразрядных приборов и лазеров.

7. Фотоника и лазерные, включая аддитивные, технологии.
8. Компьютерные технологии, компьютерное моделирование.
9. Актуальные проблемы химии.
10. Новые материалы и химические технологии.
11. Проблемы экологии. Охранно-сберегающие технологии. Экология космического пространства.

Как заранее подготовиться к переменам в машиностроительной отрасли, как правильно определить свои конкурентные преимущества? На эти вопросы постараются дать ответ участники круглого стола "Создание конкурентоспособного оборудования по основным направлениям аддитивной лазерной технологии". В рамках Конференции будут организованы выставка высокотехнологичной продукции предприятий региона.

Приглашаем принять участие в Конференции. Необходимую информацию можно найти на сайте Конференции по адресу: [www.rsu.edu.ru](http://www.rsu.edu.ru). Обращаем ваше внимание на то, что 1 сентября 2014 года – крайний срок подачи заявки на участие в Конференции и тезисов ([intech-conf@rsu.edu.ru](mailto:intech-conf@rsu.edu.ru)).

Зам. председателя оргкомитета Конференции  
В. Степанов, д.ф.-м.н., заведующий кафедрой общей  
и теоретической физики  
МПФ РГУ им. С.А. Есенина

## БЕЗОШИБОЧНЫЕ КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ЦЕПЯХ

Быстрая декогерентизация нежных квантовых состояний приводит к ошибкам при операциях с кубитами. Для коррекции этих ошибок разработаны специальные алгоритмы. Но они эффективны лишь в том случае, если точность выполнения каждой операции не ниже некоторой пороговой величины, около 90%, то есть если ошибки "не очень серьезные". В работе [R. Barends et al. – Nature 2014, v.508, p.500] показано, что этому критерию удовлетворяют сверхпроводниковые кубиты транзмонного типа (двухуровневые системы из двух джозефсоновских переходов, образующих микроСКВИД). Для них точность однокубитных и двухкубитных операций составляет 99,92% и 99,4%, соответственно. Джозефсоновский квантовый процессор с линейной цепочкой кубитов легко масштабируется, что позволяет осуществлять многокубитные помехоустойчивые вычисления. Возможности такого процессора сильно возрастут, если перейти к двумерной сетке кубитов.

А. Опенев,

печатается с разрешения Информ. бюл. "Перст"